

<https://helda.helsinki.fi>

---

## CloseLoop-loppuraportti

Karppinen, Maarit

CloseLoop.fi

2019-07-05

---

Karppinen , M , Kauranen , P , Lammi , M , Antikainen , M , Huttunen-Saarivirta , E , Kallio , T , Karttunen , A , Koukkari , P , Lundström , M , Majaniemi , S , Naumanen , M & Repo , P  
2019 , CloseLoop-loppuraportti . julkaisussa CloseLoop-loppuraportti . CloseLoop.fi . <  
<http://closeloop.fi/closetloop-loppuraportti-julkaistu/> >

---

<http://hdl.handle.net/10138/316241>

---

unspecified

publishedVersion

---

*Downloaded from Helda, University of Helsinki institutional repository.*

*This is an electronic reprint of the original article.*

*This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.*

*Please cite the original version.*

## CloseLoop-loppuraportti

**Maarit Karppinen, Pertti Kauranen, Minna Lammi, Maria Antikainen, Elina Huttunen-Saarivirta, Tanja Kallio, Antti Karttunen, Pertti Koukkari, Mari Lundström, Sami Majaniemi, Mika Naumanen, Petteri Repo.**

### 1. Johdanto

Kiertotalous on noussut viimeaikaisissa keskusteluissa ja poliittisissa ohjelmissa yhdeksi mahdolliseksi keinoksi ratkaista tuotannon, kulutuksen ja luonnonvarojen liikkäytön aiheuttamia ympäristöongelmia taloudellisesti kestäväällä tavalla. Niin Euroopan unioni kuin yksittäiset maat kuten Hollanti, Saksa, Britannia ja Suomi ovat olleet aktiivisia kiertotalouden puolestapuhujia. Useat julkiset ja yksityiset toimijat Suomessa ovat lähteneet edistämään kiertotaloutta toiveena Suomen kehittäminen kiertotalouden mallimaaksi.

Kiertotalouteen pääseminen vaatii systeemisen muutoksen yhteiskunnassa. Kiertotaloudessa tuotantoon otetut resurssit käytetään mahdollisimman tehokkaasti, ne pidetään pitkään kierrossa ja käytöstä poistettujen tuotteiden materiaalit hyödynnetään. Tuotteet suunnitellaan lähtökohtaisesti pitkäkestoisiksi, uudelleen käytettäviksi (korjaus/päivitys) ja käytetyt materiaalit helposti kierrätettäviksi, jolloin voidaan minimoida tuotannossa tarvittavien uusien raaka-aineiden ja syntyvän jätteen määrää. Ihannetapauksessa jätettä ei synny lainkaan, tai se käytetään raaka-aineena uusien tuotteiden valmistuksessa.

Prosessivaaltainen suomalainen teollisuus käyttää runsaasti sekä uusiutuvia että uusiutumattomia raaka-aineita tuotannossaan. Huomattava osa materiaalivirroista päätyy kuitenkin jalostuksessa hyödyntämättömiksi poiste- ja sivuvirroiksi ja jopa miljoonia tonneja varastoidaan tehdaspaikkakunnilla ongelmajätteinä. Siten on ensiarvoisen tärkeää kehittää sivuvirtojen ja jätevirtojen innovatiivisia uusiokäyttöjä, jotka mahdollistavat niiden sisältämien arvokkaiden mineraalijakeiden, metallien ja kemikaalien kierrättämisen tuotteina.

Tulevaisuuden haasteena on uudistaa perinteiseen suomalaiseen osaamispohjaan perustuva kokemusperäinen prosessitieto ja luoda uusia läpimurtoja sekä uusien innovatiivisten kokeellisten menetelmien käyttöönotolla, että modernin tietotekniikan avulla. Suomen perinteisesti korkeatasoiseen prosessiosaamiseen perustuen voidaan myös jatkojalostaa ulkomaisia kierrätysmateriaaleja käytettäväksi uusiin high-tech-tuotteisiin, tyypillisenä ajankohtaisena esimerkkinä akkumetallit ja kemikaalit.

Suomen Akatemian Strategisen tutkimuksen neuvoston rahoittamassa CloseLoop –hankkeessa on tarkasteltu kiertotalouden mahdollisuuksia Suomessa ja alueellisesti keskittyen erityisesti arvokkaisiin metalleihin, kehitetty uusia kierrätysteknologioita ja korvaavia materiaaleja kriittisille raaka-aineille sekä kehitetty kiertotalouden työkaluja yritysten ja julkisen sektorin tarpeisiin. Tässä raportissa kerrotaan lyhyesti hankkeen keskeisistä tuloksista ja politiikkasuosituksista.

### 2. Systeemitason tarkastelut

#### 2.1. Alueelliset ja kansalliset ekosysteemit

Kiertotalouteen siirtyminen on kokonaisvaltainen sosio-tekniinen murros, jonka yhteydessä nykyiset tuotannon rakenteet, liiketoimintamallit, tuotteet ja kulutuksen käytännöt muuttuvat

perustavanlaatuisesti. Tämä edellyttää samanaikaisia ja perättäisiä muutoksia toiminnan kaikilla tasoilla, mm. tuotannossa ja kulutuksessa. Yksittäinen toimija ei pysty yksin saamaan aikaan muutosta vaan yritykset, poliittiset päättäjät ja muut yhteiskunnalliset toimijat vaikuttavat toisiinsa sekä toteutuvan muutoksen laajuuteen ja suuntaan. CloseLoop –hankkeessa järjestimme yhteensä neljä työpajaa, joista kolme keskittyi alueellisen tason kiertotalouden kehitykseen Kokkolan, Porin (Satakunnan) ja Lappeenrannan (Etelä-Karjala) alueilla. Neljäs työpaja kokosi yhteen kansallisen tason (Työ- ja Elinkeinoministeriö, Ympäristöministeriö, Sitra, Motiva, VTT) ja alueellisen tason toimijat etsimään yhteisiä toimintamahdollisuuksia nopeuttaa ja vahvistaa kiertotalouteen siirtymistä Suomessa.

Alueellisten työpajojen tuloksena tunnistettiin neljä toimialasta ja alueesta riippumatonta kehittämiskohdetta kiertotalouden edistämiseksi:

1. Brändin ja mielikuvien rakentamisen mahdollisuudet
2. Tiedonjakamisen merkitys
3. Osaamisen ja (ammattillisen) koulutuksen tärkeys
4. Innovaatioiden, testauksen ja kaupallistamisen haasteet

Kiertotalouden toteutumisen kannalta keskeisessä roolissa ovat yhteistyö, tieto ja koulutus. Kiertotalouden tavoitteiden toteutumista edistäisi se, että keskeiset toimijat työskentelisivät yhteistyössä yli toimiala- ja organisaatorajojen. Yhteistyön vahvistamiseksi ja toiminnan koordinoimiseksi puolueeton, pitkäjännitteisesti toimiva organisaatio koettiin tarpeelliseksi. Tällainen toimintaa koordinoiva organisaatio lisäisi osaltaan eri toimijoiden välistä luottamusta ja pystyisi yhdistämään eri toimijoita esimerkiksi uusien liiketoimintamallien kehittämiseksi. Tällaisen organisaation koettiin myös mahdollistavan taloudellisten, tuotannollisten ja osaamisresurssien tehokkaamman käytön.

**Lisää aiheesta:** Kiertotalouden alueellisen edistämisen mahdollisuudet: <https://bit.ly/2VCk00y>

## 2.2. Liiketoimintamallit

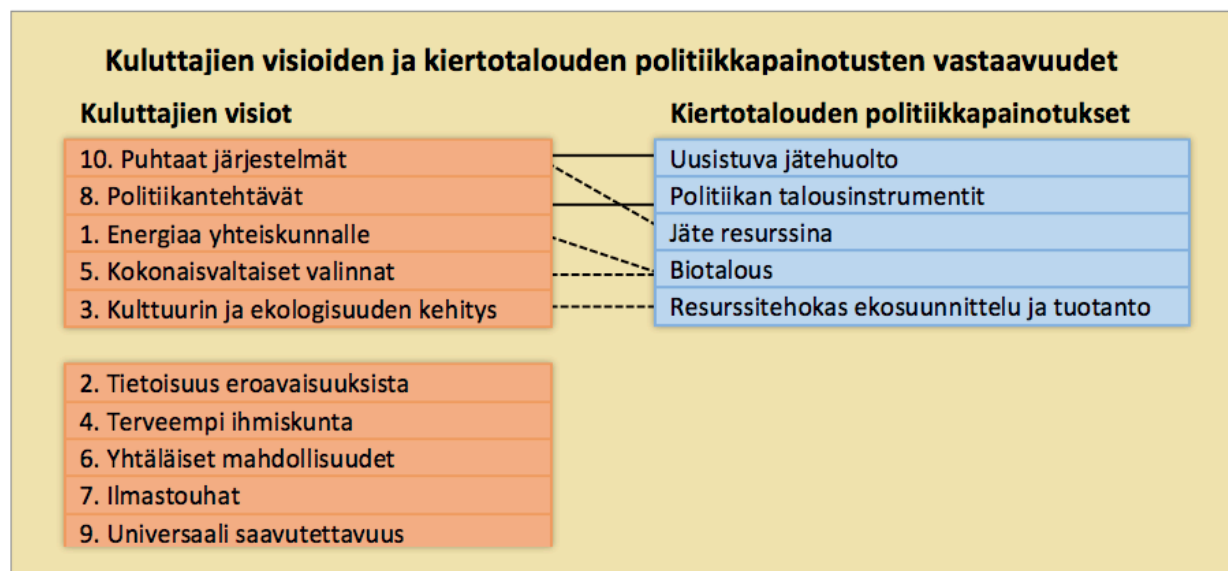
Kiertotalous vaatii uusia liiketoimintamalleja, jotka pohjautuvat entistä enemmän yhteistyöhön. Keskeistä on, että integroidaan asiakkaalle tuotettavan arvon lisäksi arvo sidosryhmille, mukaan lukien ympäristö ja yhteiskunta. Ymmärrys siitä, miten arvoa voidaan ansaita uusilla tavoilla, on osin vielä kehittymättömätöntä. Palvelullistaminen on eräs tapa saada pienennettyä, suljettua sekä hidastettua käytettävien resurssien kehiä, mutta tämä vaatii usein koko liiketoimintamallin uudistamisen. Palveluliiketoiminnassa tuotteen myynti, tekniset ratkaisut ja tuotteen omistaminen eivät ole enää keskiössä. Tarjottava ratkaisu sisältää usein sekä tuotteen että joustavan määrän lisäpalveluja omistusoikeuden sijaan. Digitaalisuuden rooli kiertotalouden palveluliiketoimintamalleissa on merkittävä, koska se mahdollistaa ajantasaisen tiedon käytettävien resurssien paikasta, kunnosta ja saatavuudesta, jolloin transaktiokustannukset voidaan minimoida. Palvelullistaminen voi vaatia uusia ansaintalogiikoita, esimerkiksi siirtymisen kuukausimaksuun. Näin asiakas maksaa saadusta palvelusta sen käytön aikana eikä etukäteen tuotteen hankintahintana. Jotta yritykset voivat kehittää kiertotalouden liiketoimintamalleja tarvitaan työkaluja ja -menetelmiä pohjautuen uuteen kiertotalouden dynamiikkaan.

### Lisää aiheesta:

Antikainen, M, Uusitalo, T, Kivikytö-Reponen, P. (2018). Digitalisation as an Enabler of Circular Economy, 10th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems, IPS2 2018, 29-31 May 2018, Linköping, Sweden.  
<https://bit.ly/2Femj1e>

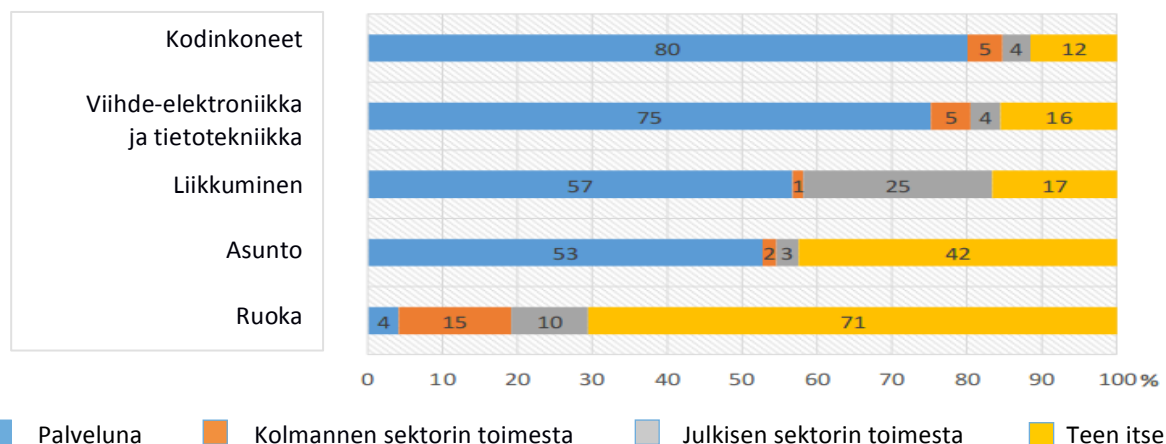
### 2.3. Kuluttajat

Kuluttajilla on merkittävä rooli monissa kiertotalouden toteutuksissa, mutta heidän merkityksensä ei juuri näy kiertotalouden eurooppalaisissa politiikkaratkaisuisissa. Jotta kuluttajista voisi tulla merkittäviä toimijoita kiertotaloudessa ja siten kiertotaloudesta menestyksestä, on tärkeää tunnistaa kuluttajien kiertotalouteen asettamia toiveita. CloseLoop –hankkeessa tarkastelimme eri Euroopan maiden kansalaisten visioita kestävästä tulevaisuudesta ja vertasimme niitä eurooppalaisiin politiikkapainotuksiin.



Kuluttajien visioiden ja kiertotalouden politiikkapainotusten väliset selkeät vastaavuudet koskevat jätehuollon ja politiikan talousinstrumenttien painotuksia. Myös kuluttajan valintaan sekä ekologiseen kehitykseen liittyviä osittaisia vastaavuuksia on tunnistettavissa. Suomalaiset ovat kiinnostuneita kiertotalouden ratkaisuista. Tekemässämme edustavassa kyselyssä suomalaiset sanoivat suosivansa kierrätystä ja tuotteiden korjaamista jakamistalouden sijaan. Naiset, korkeasti koulutetut, vanhemmat ikäluokat (35-79-vuotiaat) sekä keski- ja hyvätuloiset kotitaloudet ovat laajimmin omaksuneet materiaalien viemisen kierrätyskeskukseen. Tuotteiden korjausta suosivat 25-49-vuotiaat sekä korkeatuloiset. Jakamistalous kiinnostaa naisia enemmän kuin miehiä, kuten myös alle 50-vuotiaita.

#### Kuinka mieluiten pidennät seuraavien tuotteiden käyttöikä?



Tuotteiden ja palveluiden käyttöiän pidentämisessä suositaan palveluita (kts.kuva). Kodinkoneiden sekä viihde-elektroniikan ja tietotekniikan käyttöikää pidennetään mieluiten käyttämällä korjauspalveluja. Myös liikkumisen ja asumisen aloilla käyttöikää halutaan pidentää palveluiden avulla. Liikkumisen osalta julkisella sektorilla nähdään olevan tärkeä rooli. Ruoan käytettävyyttä pidennetään mieluiten itse, joskin kolmannella sektorilla nähdään rooli tässä. Kyselyyn vastasi 1555 kuluttajaa ja se edustaa Manner-Suomen 18-79-vuotiasta väestöä.

#### Lisää aiheesta:

Repo, P, Anttonen, M, Mykkänen, J, Lammi, M (2018) Lack of congruence between European citizen perspectives and policies on circular economy. European Journal of Sustainable Development. Vol 7, No1.

<https://ecsdev.org/ojs/index.php/ejsd/article/view/618>

#### 2.4. Systeemitason kiertotalousprosessit

CloseLoop-projekissa yhtenä keskeisenä tutkimusmenetelmänä on ollut systeemitason matemaattinen mallinnus. Mallien avulla voidaan kehittää kriittisiä raaka-aineita korvaavia materiaaleja ja komponentteja, analysoida jätevirtojen hyödyntämisen taloudellisia reunaehdoja sekä optimoida talteenotto-prosessien suorituskykyä ja vahvistaa kokeellista tutkimusta merkittävästi.

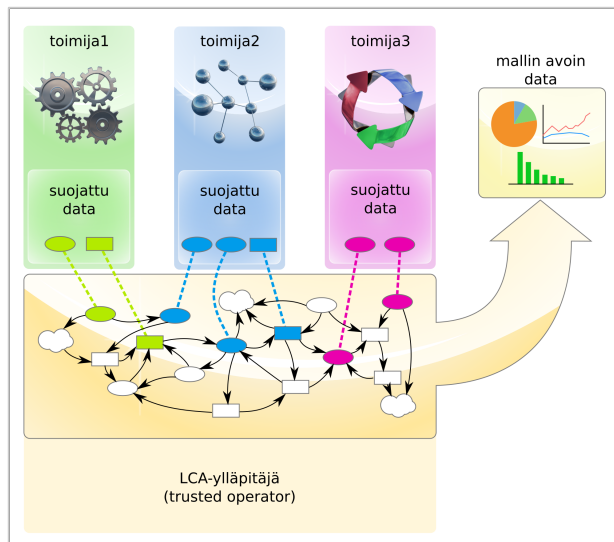
Vaatus pystyä liittämään eri tasojen ja aihepiirien kuvaukset ja data toisiinsa tekee kiertotalousprosessien mallinnuksesta haastavan. CloseLoop-projektissa tämä ongelma on ratkaistu luomalla Modelling Factory -työtila, jota voivat hyödyntää materiaalisuunnittelijat, yritysten edustajat sekä vaikutusanalyysistä kiinnostuneet poliittiset päätöksentekijät. Modelling Factory-työtila ja sen analyysipalvelut mahdollistavat kiertotalousprosessien yhteisöllisen suunnittelun, kvantitatiivisen arvioinnin ja optimoinnin.

CloseLoop-hankkeen tärkeänä tutkimuskohteena ovat toimineet tulevaisuuden vähähiilisen energiateknologian tuotteita edustavat litium-akut, joiden käytön oletetaan kasvavan voimakkaasti. Erityisesti arvometallien kiertotalouteen ja sähköautopohjaiseen liikkumiseen liittyen Modelling Factory -työtilaan on rakennettu simulointimalleja. Luotuja työkaluja on hyödynnetty keväällä 2018 järjestetyssä työpajassa yhteistyössä EIT Raw Materials KIC:n kanssa. Mallinnuksessa on myös kiinnitetty huomioita materiaali- ja prosessidatan yhdistämiseen, kiertotaloutta tukeviin uusiin liiketoimintamalleihin sekä kulutuskäyttäytymiseen.

Systeemitason työkalujen kehityksen motivaationa on toiminut EU:n kiertotalouspaketti, jonka tavoitteena on varmistaa kaikkien raaka-aineiden, tuotteiden ja jätteiden aiempaa kestävämpi käyttö, edistää energiansäästöä sekä vähentää syntyvien jätteiden määrää. Jatkokehitysversiota Modelling Factory -työtilaan luodusta analyysipalvelusta tullaan demonstroimaan kevään 2019 aikana mm. Työ- ja elinkeinoministeriölle.

Kiertotalousyhteiskunnan kehittäminen vaatii uusia työkaluja ja käytäntöjä yritysten väliseen kommunikointiin. Näitä tarpeita ajatellen CloseLoop-projektissa on kehitetty jalostuneempi versio 'perinteisestä' elinkaarianalyysistä (LCA), joka mahdollistaa monen toimijan välisen samanaikaisen LCA-arvioinnin, mistä syystä se on ristitty verkosto-LCA -palveluksi. Tämä palvelu mahdollistaa mm. materiaali-, energia-, ja hiilijalanjälkien vaikutusten arvioinnin ja optimoinnin sekä yksityisen yrityksen että verkoston tasolla ilman, että toimijoiden tarvitsee luovuttaa toisilleen arkaluontoisia tuotantotietojaan. Verkosto-LCA-palvelun avulla voi hakea vastauksia mm. tuotantoprosesseihin liittyviin kiertotalouskysymyksiin kuten vaikkapa siihen, miten kriittisiksi luokitellut raaka-aineet (CRM)

kiertävät verkostossa, mikä vaikutus raaka-aineiden kierrätysasteen nostamisella on jonkin tietyn tuotteen valmistuksessa tai kuinka voidaan pitää verkostossa kiertävät materiaalit mahdollisimman korkeassa jalostusarvossaan koko elinkaaren yli. Toimintaperiaatetta on havainnollistettu ao. kuvassa.



*Yritykset voivat verkosto-LCA-palvelun avulla optimoida sekä omaa että koko verkoston hiilijalanjälkeä esim. sähköautojen akkuteknologioiden vaikutuksia kartoittaessaan. Verkosto-LCA -palvelu on käytettävissä Modelling Factory -portaalin kautta.*

#### Lisää aiheesta:

<https://bit.ly/2USWQyn>

<https://bit.ly/2IRLgCb>

<https://bit.ly/2VEOD5q>

### 2.5. Skenaariotarkastelut

CloseLoopin sidosryhmille tehdyn kyselyn perusteella yritysten panostukset kiertotaloutta tukeviin ratkaisuihin sekä niiden vaatiminen alihankkijoilta ja yhteistyökumppaneilta on merkittävin kiertotalouden toteutumista edistävä tekijä Suomessa. Toiseksi tärkein tekijä on hyvä yleinen talouskehitys, mikä sallii tarvittavat kiertotalousinvestoinnit. Todennäköisin kiertotaloutta editävä kehityskulku maassamme on se, että kiertotalouteen syntyy Suomessa aktiivisia startup-yrityksiä. Osa näistä kasvaa itsenäisesti kansainvälisille markkinoille, kun taas osan ostavat isot yritykset uusiksi liiketoiminnoikseen.

Kiertotalousvision toteutumisen taustalla on runsaasti eri teknologioita. Nämä liittyvät materiaalien keräykseen ja käsittelyyn, tuotteissa käytettävien materiaalien kehittämiseen, tuotesuunnitteluun ja valmistamiseen, tuotteen elinkaaren hallintaan ja siihen osallistuvien yritysten väliseen yhteistyöhön sekä kaikkia näitä yhdistävään tietojenkäsittelyyn – mukaan luettuna sosiaalisen median teknologiat.

Olennessa teknologia-alue kiertotalouden saavuttamiselle on arvoverkkojen integraatio. Tämä tarkoittaa esimerkiksi tuotetiedon saumatonta kulkua liiketoiminta- ja kierrätysarvoketjujen välillä. Tulos on hyvin linjassa yllä mainitun yritysten panostusten merkittävyyden kanssa.

Muita merkittäviä teknologia-alueita ovat raaka-aineiden käsittelyn ja materiaalitekniikoiden kehittäminen, esimerkiksi materiaalien korvaaminen siten, että ne ovat paremmin kierrätettävissä tai että niiden elinkaaren aikainen hiilijalanjälki pienenee. Nämä ovat myös teknologia-alueita, joiden kehittämisestä voi tulla merkittävää liiketoimintaa suomalaisille yrityksille. Samaan liiketoimintapotentiaaliltaan korkeaan luokkaan kuuluvat myös kierrätysmateriaalien esikäsittelyn, älykkään tuotannon sekä koneoppimisen, konenäön, robotiikan yms tekoälyä edistävät tai sitä



hyödyntävät teknologiat. Kierrätysmateriaalien esikäsittely käsittää muun muassa jättemateriaalin lajittelun taloudellisesti kannattaviksi prosessieriksi. Älykäs tuotanto sisältää esimerkiksi valmistuksen automaattisen seurannan ja ohjauksen, tulevaisuudessa myös suoran koneiden välisen M2M-kommunikaation.

#### Lisää aiheesta:

Naumanen, M. and Popper, R. (2017) Action roadmaps paving the way towards electric mobility and circular economy; World Congress on Nanoscience & Nanotechnology, Journal of Nanomedicine & Nanotechnology.

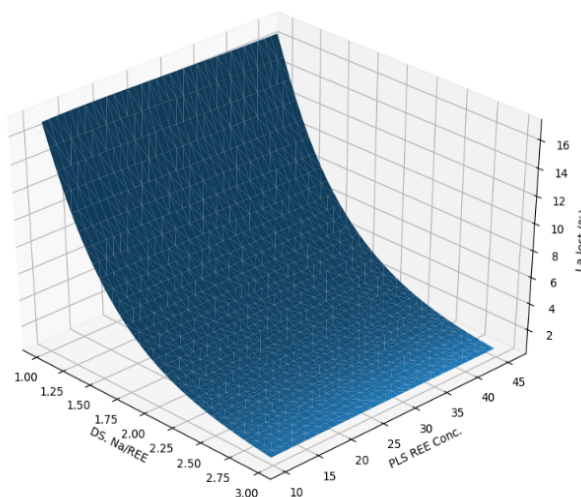
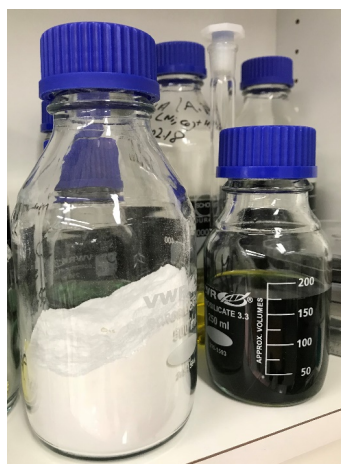
<https://bit.ly/2LcU8nP> <https://bit.ly/2GMr7tJ>

### 3. Teknologiakehitys

#### 3.1. Kierrätysprosessit

Suomalaisen teknologia- ja tiedeosaamisen kehittämisen kannalta runsaasti mahdollisuuksia syntyy prosessi- ja cleantech-osaamisen pohjalle. Keskeiset tulevaisuuden megatrendit tarjoavat tarpeellisen kasvualustan tämän osaamisen uudistamiselle, kun sekundäärraaka-aineiden käyttö lisääntyy, prosessikiertoja suljetaan yhä tiiviimmin, sivuvirrat hyödynnetään teollisissa symbiooseissa ja päästöjä vähennetään entisestään.

Sähköautojen ja akkujen käyttö kasvaa tulevina vuosina huomattavasti. Sekundäärraaka-aineiden kierrätysteknologiaa kehitetään jatkuvasti, jotta sekä perusmetallit, kuten koboltti, nikkeli ja kupari sekä nykyisellään huonosti kierrätetyt litium, mangaani ja harvinaiset maametallit saataisiin kierrätettyä. Closeloop-projektissa tutkittiin sekä litiumakkujen että NiMH-akkujen kierrätysprosesseja. Harvinaisten maametallien talteenottoon NiMH-akuista optimoitiin saostamalla kaksoissuolana (kuva), kun taas litiumakkujen kierrätyksessä optimoitiin sekä koboltin saantoa mekaanisessa erotusvaiheessa että kuparin talteenottoa jo liuotusvaiheessa rikastesakkana. Myös litiumin talteenottoa kehitettiin sekä rikkihappo- että suolahappoprosessissa.



*Rikkihappoon liuotettua NiMH-akkujätettä (vihreä liuos) ja kaksoissuolana saostettuja harvinaisia maametalleja (REE) (valkea jauhe) sekä prosessiolosuhteiden vaikutus harvinaisten maametallien saostuksessa. Kuva: Antti Porvali, Aalto-yliopisto.*

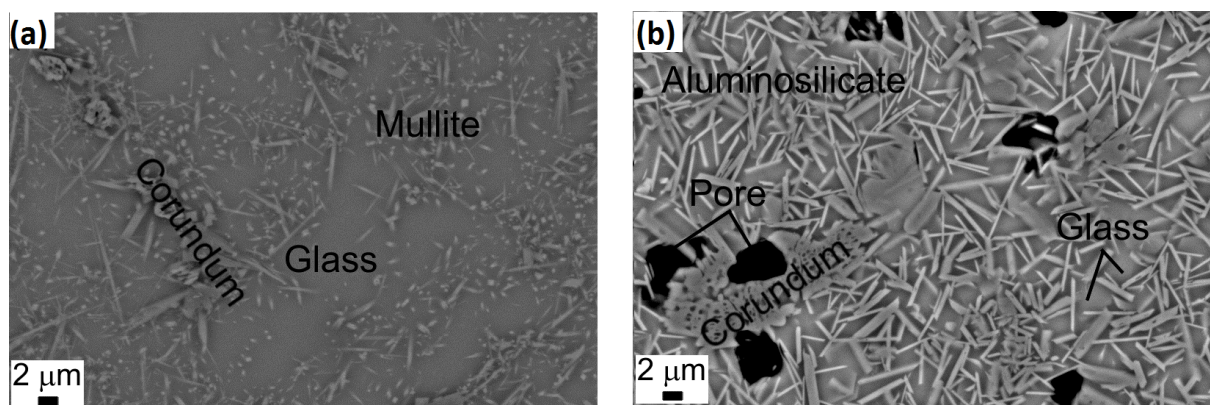
Lisää aiheesta: <https://bit.ly/2ZNAZfD>

### 3.2. Sivuvirtojen hyödyntäminen

CloseLoop -projektissa kartoitettiin potentiaalisia teollisuuden sivuvirtoja hyödynnettäväksi korkean jalostusarvon sovelluksissa. Sovellusten kannalta kiinnostavimmiksi nousivat teollisuuden mineraaliset sivuvirrat, erityisesti kaivosteollisuuden rikastushiekat ja terästeollisuuden kuonat, ja niiden hyödyntäminen keraamimateriaalien valmistuksessa mm. korkean lämpötilan lämmön- ja sähköneristyssovelluksiin. Rikastushiekkojen koostumuksen ja ominaisuuksien räätälöintiin käytettiin metalliteollisuuden sivuvirtana muodostuvaa alumiinihydroksidi pitoista sakkaa.

Tutkimus tuotti uutta tietoa rikastushiekkojen hyödynnettävyydestä keraamien raaka-aineena, erityisesti muodostuvista faasirakenteista ja rikastushiekkojen koostumuksen vaikutuksesta faasien muodostumiseen. Kvartsi- ja maasälpäpitoisia rikastushiekoja molybdeeni-, kulta- ja kvartsikaivoksista käytettiin raaka-aineena keraamien valmistuksessa korkean lämpötilan sovelluksiin ja talkkimalmin rikastushiekkaa hyödynnettiin keraamien ja pinnoitteiden valmistamiseen mm. sähköneristyssovelluksiin. Esimerkiksi silikaattipitoisen rikastushiekan ja alumiinihydroksidin reaktiosintrauksessa muodostuu neulasmaista mulliittifaasia (Kuva a), joka kestää hyvin korkeita lämpötiloja ( $>1450^{\circ}\text{C}$ ), kun taas maasälpäpitoisesta rikastushiekasta ei toivottua mulliittifaasia syntynyt (Kuva b). Magnesiittipitoisesta rikastushiekasta ja alumiinihydroksidista termisesti ruiskutetut pinnoitteet olivat sähköneristysominaisuuksiltaan ja kulumiskestävyydeltään jopa hieman primääraaka-aineista valmistettuja pinnoitteita paremmat.

Terästeollisuuden kuonien osalta tutkimuksessa tarkasteltiin ferrokromikuonan käyttöä korkean lämpötilan refraktorimateriaalien runkoaineena. Kuonaa sisältävät refraktorivalut olivat puristuslujuudeltaan samaa tasoa vastaavan kaupallisen materiaalin kanssa. Lämmöneristysominaisuuksiltaan kuonaa sisältävät materiaalit olivat jopa kaupallista vertailumateriaalia paremmin eristäviä.



Pyyhkäiselektronimikroskooppikuva rikastushiekoista valmistetuista keraamimateriaaleista. a) reaktiosintraamalla valmistettu rakenne, jossa mulliittiverkosto. b) rikastushiekasta valmistettu rakenne, jonne ei ole muodostunut mulliittia.

#### Lisää aiheesta:

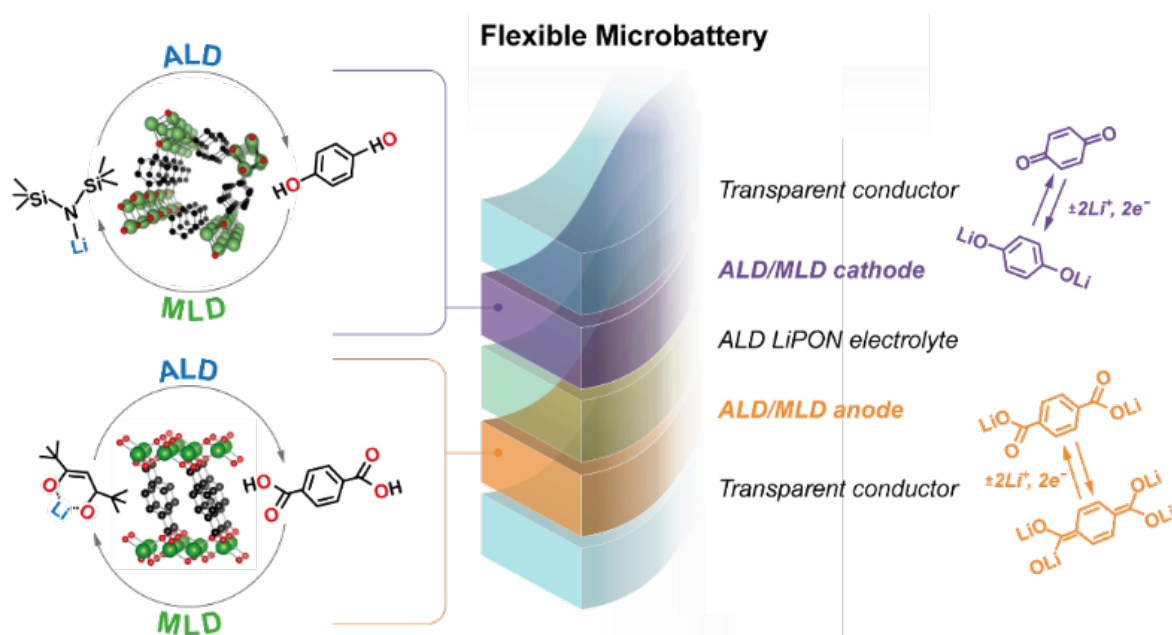
Karhu, M., Lagerbom, J., Solismaa, S., Huttunen-Saarivirta, E. Magnesite-rich mining tailing utilization as raw material for refractory ceramics - microstructural and thermal analysis study, Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 68/2, 2019, <https://bit.ly/2GXXWOU>



### 3.3. Kriittisten raaka-aineiden korvaaminen

Vähähiiliseen yhteiskuntaan siirtyminen edellyttää siirtymistä enenevässä määrin uusiin kestäviin energian tuotannon, konversion ja varastoinnin teknologioihin. Useimmissa hiilitalouden kannalta edullisissa energiateknologioissa aktiivisina komponentteina toimivat materiaalit perustuvat kriittisiin raaka-aineisiin, mikä voi estää niiden laajamittaisen hyödyntämisen. Esimerkiksi suunnitelmat nykyisen Li-ioniakku tuotannon kasvattamisesta ovat synnyttäneet välittömän huolen niissä käytettävän kobolttin riittävydestä. Energiaa voitaisiin myös varastoida vetyyn kemiallisessa muodossa, mutta nykyiset teknologian toimivuuden takaavat katalyytit perustuvat harvinaisiin ja kalliisiin jalometalleihin. Kolmas harvinaisiin tai muuten kriittisiin raaka-aineisiin perustuvista energiateknologioista on hukkalämmön muuntaminen sähköenergiaksi termosähkölaitteessa. Nämä laitteet ovat muuten loistoesimerkki kestävä kehityksen mukaisesta energian talteenotosta ja konversiosta, mutta ne koostuvat nykyisellään erittäin harvinaisista ja osin myrkyllisistäkin alkuaineista. CloseLoop-projektissa etsittiin uusia korvaavia materiaaleja kaikkiin edellä mainittuihin tulevaisuuden energian varastointi- ja konversio-teknologioihin.

Projektissa kehitettiin esimerkiksi uusi innovatiivinen orgaanisiin elektrodimateriaaleihin perustuva täysin kobolttivapaa mikroakku, jossa litium on ainoa metallinen alkuaine. Kobolttin käytön välttäminen ei ole kuitenkaan uuden suomalaisella ALD/MLD ohutkalvoteknologialla toteutetun mikroakun ainoa etu. Muina etuina ovat sen keveys, taipuisuus ja jopa läpinäkyvyys, samoin kuin oleellisesti yksinkertaisempi kierrätettävyys. Uskommekin että tulevaisuudessa kehittämiämme mikroakkuja voidaan hyödyntää esimerkiksi puettavassa elektroniikassa ja erilaisissa älylaitteissa, joissa tarvitaan lukematon määrä pieniä antureita ja sensoreita tiedon keräämiseen ja välittämiseen.



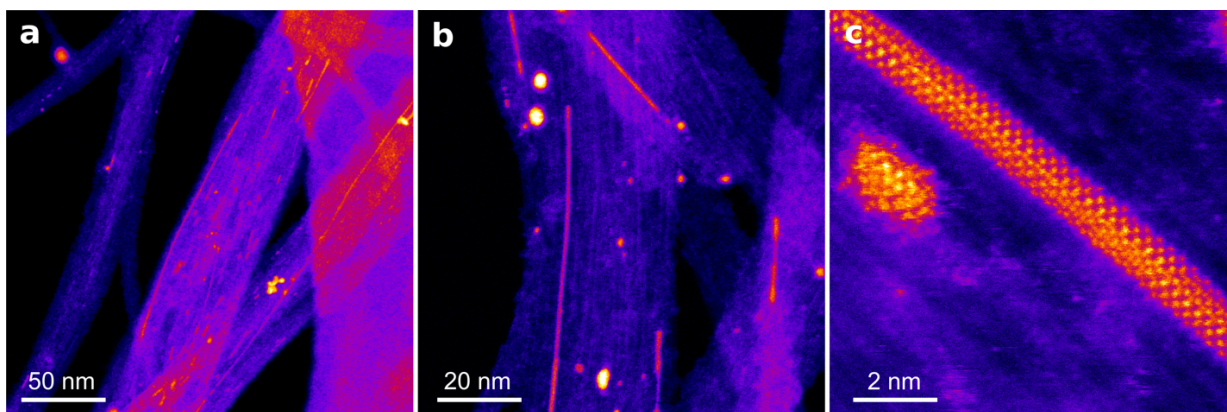
*Li-orgaanisiin elektrodeihin perustuvan taipuisan ja läpinäkyvän mikroakun valmistaminen ALD/MLD (atomic/molecular layer deposition) ohutkalvotekniikalla.*

Toinen tutkittu energian varastointimuoto liittyy vetytalouteen, jossa uusiutuvista mutta kausiluontoisista energialähteistä kuten aurinko- ja tuulivoimasta huipputuotantokausien aikana saatu ylimääräinen sähköenergia muunnetaan vedyksi. Vety varastoidaan ja otetaan sitten tarvittaessa

käyttöön. Vetyä voidaan käyttää sellaisenaan liikennevälineissä polttoaineena tai kemianteollisuudessa raaka-aineena, tai sitten sen sisältämä kemiallinen sidosenergia voidaan muuntaa takaisin sähköksi.

Veden sähkökemiallinen elektrolyysi on ympäristöstävälinen ja tehokas tapa muuntaa ylimääräsähkö vedyn sidosenergiaksi. Elektrolyysireaktiossa vesi pilkotaan katalyytin pinnalla hapeksi ja vedyksi. Katalyytti on välttämätön reaktoiden tehokkuuden lisäämiseksi, mutta ongelma on, että nykyiset katalyytit sisältävät huomattavia määriä harvinaisia jalometalleja kuten platinaa ja iridiumia, joiden korvaaminen tai huomattava vähentäminen on välttämätön edellytys tämän teknologian laajamittaiselle käyttöönnotolle.

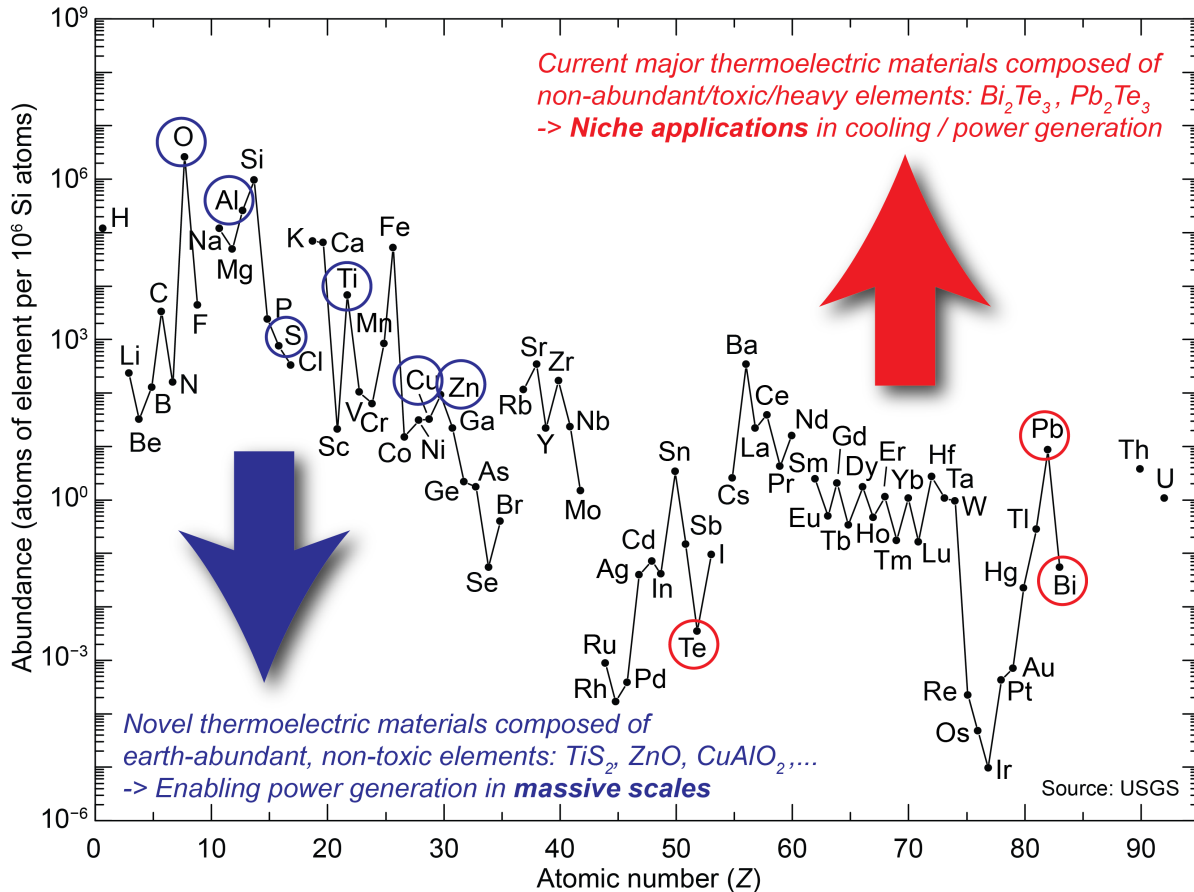
Kaupallisten platinapitoisten katalyyttien korvaaminen jalometallia sisältämättömillä vaihtoehdoilla ei ole mahdollista ilman huomattavia häviöitä vedynkehitysprosessissa. Tämän vuoksi CloseLoop-projektissa kehitettiin materiaaleja, joiden platinapitoisuus on hyvin alhainen. Hiilinanoputkien pinnalle saostetut platinananolangat pystyivät tuottamaan vetyä laboratoriomittakaavan elektrolyysilaitteistossa lähes samalla tehokkuudella kuin kaupallinen katalyytti kymmenen kertaa suuremmalla platinamäärällä. Lisäksi tämä katalyytti osoittautui hyvin kestäväksi sillä 2000 tunnin kennon testin aikana ei havaittu vedyntuotantokyvyn laskua. Alustavien kokeiden perusteella projektissa kehitetty materiaali on myös kestävämpi kuin kaupallinen verrokki, mikä myös on tärkeää elektrolyysiteknologian kestävyttä ajatellen.



*Elektronimikroskopikuvia sähkökemiallisesti erityisen aktiivisista platinananolangoista. Kuva: TkT Toma Susi, Wienin yliopisto.*

CloseLoop-projektissa etsittiin uusia korvaavia materiaaleja myös termosähköisiin energiankeruulaitteisiin, joissa hukkalämmön voisi muuntaa suoraan sähköenergiaksi. Nykyisellään termosähköisten materiaalien soveltamista laajassa mittakaavassa rajoittaa sekä tunnettujen materiaalien heikohko suorituskyky korkeissa käyttölämpötiloissa että niiden epäedullinen raaka-ainekoostumus. CloseLoop-hankkeessa tutkittiin kriittisten raaka-aineiden korvaamista maankuoresta varsin yleisesti esiintyvien metallien kuten kuparin, nikkelin ja sinkin oksideilla. Tutkimusta tehtiin hyödyntäen sekä kokeellisia että laskennallisia tutkimusmenetelmiä. Materiaalien lämmönjohtavuuden ymmärtäminen on keskeisessä roolissa parempien termosähköisten materiaalien kehitystyössä. Kehitimme uusia laskennallisia menetelmiä lämmönjohtavuuden tutkimista varten ja tämän ansiosta olemme pystyneet tutkimaan lämpösähköisten metallioksidien lämmönjohtavuusominaisuuksia tarkemmin kuin kukaan muu aiemmin. Uskomme, että hankkeessa esiinnostetut/kehitetyt metallioksidimateriaalit ovat lupaavia uusia materiaaleja korvaamaan nykyisiä harvinaisia tai myrkyllisiä

alkuaineita kuten telluriumia ja lyijyä sisältäviä materiaaleja niin että termosähköä voitaisiin hyödyntää toisaalta entistä suuremmassa mittakaavassa, toisaalta energiankeruusovelluksissa jotka toimivat entistä laajemmalla lämpötila-alueella.



Termosähkölaitteissa käytettävien alkuaineiden yleisyys: nykyisten materiaalien alkuaineet punaisella ja CloseLoop-projektissa tutkittujen materiaalien alkuaineet sinisellä.

Lisää aiheesta: <https://bit.ly/2VC7IFj>

### 3.4. Kierrätysraaka-aineet valmistusprosesseissa

Kierrätysraaka-aineiden hyödyntäminen valmistusprosesseissa kulminoituu raaka-aineen koostumukseen, laatuun ja soveltuvuuteen prosesseissa. Keraamimateriaalien valmistuksessa koostumusaspekti liittyy keskeisesti termodynamiikkaan: mitkä faasit ovat termodynaamisesti stabiileja ja miten tavoitellun faasin stabiilisuusalueelle on mahdollista päästä. Koostumuksen räätälöinti sopivilla raaka-ainelisyksillä on usein välttämätöntä. Myös raaka-aineen prosessointia tarvitaan, jotta päästään homogeeniseen tai muuten parhaiten tarkoitukseen sopivaan partikkelikokojakaumaan. Rikastushiekan tapauksessa rakenteen soveltuvuus keraamimateriaalien valmistuksen raaka-aineeksi toteutettiin jauhamalla karkea rikastushiekka sopivaan partikkelikokoon. Vastaavasti ferrokromikuona jauhettiin sopivaan raekokoon, ja kokojakauma optimoitiin parhaan pakkaustiheyden saavuttamiseksi. Yhtenä rikastushiekojen jatkotutkimustarpeena hankkeessa nousi esiin tarve muokata niiden koostumusta ennen faasimuutoslämpökäsittelyä (lisätä hyödyllisten tai vähentää haitallisten faasien suhteellisia määriä) parempien ominaisuuksien saavuttamiseksi lopputuotteessa.

## 4. Politiikkasuositukset

### 4.1. Akut ja kiertotalous

Ensimmäisenä politiikkasuosituksena tammikuussa 2018 CloseLoop julkaisi ehdotuksen laatia kansallinen akku- ja energiavarastostrategia. Strategian ytimessä olisivat akkumetallit ja –kemikaalit sekä niiden kiertotalous. Suositus johti konsultaatioon Työ- ja elinkeinoministeriön kanssa, ja jo samana keväänä Business Finland käynnisti oman Batteries from Finland –hankkensa, jonka tavoitteena on luoda litiumakkujen, niiden raaka-aineiden, valmistuksen ja sovellusten ympärille miljardiluokan teollinen ekosysteemi. Aalto-yliopisto lähti Business Finlandin rahoituksella rakentamaan akkumetallien ja –kemikaalien arvonlisäyksen ja kierrätyksen ympärille laajaa BATCircle-hankekokonaisuutta, joka käynnistyi 2019 ja johon osallistuu kuusi tutkimuslaitosta, kaksi kaupunkia ja 22 yritystä. Hankkeen kokonaisbudjetti on 20 miljoonaa euroa, josta Business Finlandin rahoitus on puolet ja loput on yksityistä teollisuusrahoitusta. Suomen aktiivisuus akkujen kiertotaloustutkimuksessa on huomioitu myös Euroopassa, ja vuonna 2018 Suomi kutsuttiin koordinoimaan EU:n strategisen energiatutkimusohjelman (SET Plan) akkukierrätystutkimusta.

<https://bit.ly/2ZNEkLH>

### 4.2. Kuluttajanäkökulma

Kuluttajien ja eurooppalaisen kiertotalouspolitiikan painotusten välillä on vähän vastaavuuksia. Selkeät vastaavuudet koskevat jätehuollon ja politiikan talousinstrumenttien painotuksia. Myös kuluttajan valintaan sekä ekologiseen kehitykseen liittyviä osittaisia vastaavuuksia on tunnistettavissa. Ne kuluttajille tärkeät painotukset, joihin ei löydy selkeitä vastaavuuksia eurooppalaisesta politiikasta voisivat tarjota uusia kiertotaloutta vahvistavia politiikkavaihtoehtoja. Energia-asoiden käsitteleminen osana kiertotaloutta on kuluttajille tärkeä alue. Kuluttajien visioissa kiertotalouteen liittyvät myös sosiaalisen kestävyuden elementit, kuten terveyden edistäminen, yhdenvertaisuus ja hyvien kuluttajavalintojen tukeminen. Lisäksi ilmastokysymykset kannattaisi liittää tiiviimmin kiertotalouden politiikkaan.

<https://bit.ly/2CwS0Ax>

### 4.3. Kiertotalous ja prosessisimuloinnit

Tulevaisuuden puhtaat teknologiat vaativat innovatiivisia läpimurtoja, joita voidaan kehittää aktiivisen kokeellisen tutkimustyön ohella myös uuden tietotekniikan ja keinoälyratkaisujen avulla. Suomessa on jo useiden vuosikymmenien ajan oltu kansainvälisesti eturintamassa kehitettäessä digitaalista osaamista prosessiteollisuuden tarpeisiin. Toimivien mallien taustalla on syvälinen prosessiymmärrys ja hyvä materiaalidatan hallinta. Lähivuosien kansallisena haasteena on löytää ne tavat, joilla viime vuosikymmeninä kehitetty prosessi- ja mallinnusosaaminen voidaan uusintaa ja kehittää sitä edelleen tulevaisuuden kiertotalouden edellyttämällä tavalla.

Tietoteknisiä menetelmiä tarvitaan erityisesti prosessien ilmiöhallinnan kytkemisessä elinkaariajatteluun sekä edelleen yhdenmukaisten standardien luomiseen taloudellisesti kannattavan kiertotalouden pohjaksi. Kestävässä kiertotaloudessa eri tuotteiden rakenne samoin kuin esimerkiksi niiden kemiallis-metallurginen koostumus tulee suunnitella paitsi valmistusta ja käyttöä myös kierrättämistä silmällä pitäen. Prosessien virtuaalikuvausten kehittäminen kiertotalouteen sopiviksi edellyttää siten kierrätystuotteiden parempaa standardointia sekä tehokkaan uudelleenkäsittelyn edellyttämien

tunnisteiden käyttöönottoa. Yhdistämällä kehittynyt elinkaarianalyysi korkeatasoiseen kierrätysprosessien simulointiin luodaan kestäviä ja kansainvälisesti kilpailukykyisiä ratkaisuja sekä kotimaisten luonnonvarojen hyödyntämiselle että uudelle teknologiaviennille.

<https://bit.ly/2GY92dO>

#### 4.4. Kuluttajakäyttäytyminen

Suomalaiset kuluttajat haluavat hankkia tuotteensa uusina, tämä koskee erityisesti viihde-elektroniikkaa ja tietotekniikkaa. Ainostaan liikkumisessa uusien tuotteiden hankinta ei ole ykkösvaihtoehto. Kuluttajien mielestä vastuu uudelleenkäytöstä jakaantuu markkinoilla tuotteesta riippuen eri tavoin. Kuluttajat ovat valmiita ottamaan päävastuun asuntojen ja ruoan uudelleenkäytön järjestämisessä, mutta elektroniikan ja tietotekniikan sekä kodinkoneiden osalta vastuu halutaan myyjille ja alan muille yrityksille. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että kuluttajien ohjaaminen kiertotalouteen edellyttää erilaisia politiikkaratkaisuja kulutuksen eri osa-alueilla.

<https://bit.ly/2umiekQ>

#### 4.5. Alueelliset ja valtakunnalliset ekosysteemit

Kiertotalouden tavoitteiden toteutumista edistäisi se, että keskeiset toimijat työskentelisivät yhteistyössä yli toimiala- ja organisaatorajojen. Yhteistyön vahvistamiseksi ja toiminnan koordinoimiseksi puolueeton, pitkäjännitteisesti toimiva organisaatio olisi tarpeellinen. Se lisäisi eri toimijoiden välistä luottamusta ja pystyisi yhdistämään eri toimijoita. Tällainen organisaatio mahdollistaisi taloudellisten, tuotannollisten ja osaamisresurssien tehokkaan käytön. Suomessa erityistä on se, että kiertotalouden periaatteiden ja sisältöjen opettaminen niin ala- kuin yläkouluissa sekä toisen asteen ammatillisessa koulutuksessa koetaan erityisen tärkeäksi. Koulutus on keskeissä roolissa myös kiertotalouden kokeilukulttuurin, pienten- ja keskisuurten yritysten osaamisen sekä työnantaja- ja -tekijäjärjestöjen yhteistyön kehittämisessä.

<https://bit.ly/2vDdW9t>

**Tästä linkistä pääset hankkeen julkaisuihin. Julkaisuja on vielä tulossa, joten pysy kanavalla!**

<https://bit.ly/2UOKibv>